中国生态农业学报 2017年6月 第25卷 第6期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2017, 25(6): 941−948

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161152

张祎, 赵艳霞. 多模式集合模拟气候变化对玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 941−948
Zhang Y, Zhao Y X. Multi-model ensemble for simulation of the impact of climate change on maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 941−948

多模式集合模拟气候变化对玉米产量的影响*

张 祎[1], 赵艳霞[1,2**]

(1. 中国气象科学研究院 北京 100081; 2. 上海市气象科学研究所 上海 200030)

摘 要: 气候模式驱动作物模型是气候变化影响评估的主要手段。但是, 单一气候模式输出和作物模型的结构差异使得研究结果存在不确定性。多模式集合的概率预估可以有效减少研究结果的不确定性。为此, 本文利用1981—2009年东北地区海伦、长岭、本溪3地区农业气象站的历史气象资料和玉米作物数据, 分别建立了作物统计模型并验证了APSIM机理模型在研究区域的适用性。在此基础上, 与CMIP5在RCP4.5情景下的8个全球模式结合, 尝试基于多模式集合评估了未来2010—2039年时段和2040—2069年时段气候变化对玉米产量的可能影响(相对于1976—2005年基准时段)。研究结果表明, APSIM模型对玉米生长发育和产量形成有很好的模拟能力。玉米生育期的模拟误差(RMSE)为3~4 d, 产量的RMSE为0.6~0.8 t·hm^{-2}。建立的产量统计模型表明, 玉米出苗阶段(5月中旬)的温度增加对产量增加有积极作用, 而开花到成熟阶段(7月中旬到9月上旬)的温度和降水的增加、光照的不足均不利于产量增加。与1976—2005年基准时段相比, 气候因素影响下2010—2039年玉米产量减少3.8%(海伦)~7.4%(本溪), 减产的概率为64%(长岭)~73%(本溪); 2040—2069年时段减产6.4%(海伦)~10.5%(本溪), 减产的概率为74%(海伦)~83%(本溪)。未来2010—2039年时段和2040—2069年时段基于机理模型模拟的产量降低分别为6.6%(海伦)~8.9%(本溪)和9.7%(海伦)~13.7%(本溪), 均高于相应时段基于统计模型得到的0.9%(海伦)~6.0%(本溪)和2.0%(长岭)~7.3%(本溪)减产结果。

关键词: 气候变化; 统计模型; 机理模型; 集合模拟; 玉米; 生育期; 产量
中图分类号: S162.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0941-08

Multi-model ensemble for simulation of the impact of climate change on maize yield*

ZHANG Yi[1], ZHAO Yanxia[1,2**]

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Shanghai Institute of Meteorological Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Climate projections through process-based statistical crop models are important in studying the impacts of climate change on agricultural production. However, extensive assessments have generally relied on single climate with single crop models which have shown large discrepancies in predicted crop yields and estimations uncertainty hardly assessed. The proper understanding of uncertainties associated with such models is essential for effective use of projected results in devising adaptation strategies. Assessing crop yield response to future climate conditions based on an ensemble of possible outcomes from

* 国家自然科学基金项目(41505097)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406026)资助
** 通讯作者: 赵艳霞, 主要研究方向为农业生态系统模拟。E-mail: zyx@camscma.cn
张祎, 主要研究方向为气候变化影响与适应。E-mail: zhangyi@camscma.cn
收稿日期: 2016-12-15 接受日期: 2017-02-22
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41505097) and the Special Scientific Research Fund of Meteorology in the Public Welfare Profession of China (GYHY201406026).
** Corresponding author, E-mail: zyx@camscma.cn
Received Dec. 15, 2016; accepted Feb. 22, 2017

multiple climate projections and crop models could be more reliable than using a single model outcome. To estimate uncertainties associated with the study of the impacts of climate change on crop yield, we used 8 climate projections by GCMs under RCP4.5 in the CMIP5 (which represented the uncertainties in the projected climate change) and a statistical process-based crop model (which represented the uncertainties in the different structures or different formulations of physiological processes of crop models). Historical data of crop and meteorological data during 1981–2009 from agro-meteorological stations of China Meteorological Administration in Hailun, Changling and Benxi in Northeast China were used to establish and evaluate statistical and process-based APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) models, respectively. Then the two crop models were linked with 8 climate projections to evaluate the impact of climate change on maize yield during 2010–2039 and 2040–2069, using 1976–2005 as the baseline period. In total, 2 crop models under 8 climate projections for a period of 30 years (a total of 480 simulations) were generated for both the baseline and two future climate periods. The results showed that APSIM model well simulated the growth and yield of maize. The root mean square error (RMSE) for the growth progress (flowering and maturity) simulation was 3–4 days and that for the yield simulation was 0.6–0.8 t·hm^{-2}. The established statistical model suggested that temperature during emergence (mid May) had a positive effect on maize yield. However, the increase of temperature and rainfall, and lack of solar radiation during flowering and grain-filling periods (mid July to early September) had negative impact on increase of maize yield. Compared with 1976–2005, the resulting probability distributions indicated that due to climate change, maize yield in 2010–2039 decreased on average by 3.8% (Hailun) – 7.4% (Benxi), at a probability of 64% (Changling) – 73% (Benxi). During 2040–2069, maize yield increased by 6.4% (Hailun) – 10.5% (Benxi), at a probability of 74% (Hailun) – 83% (Benxi). The simulated yield decrease by the APSIM model was 6.6% (Hailun) – 8.9% (Benxi) during 2010–2039 and 9.7% (Hailun) – 13.7% (Benxi) during 2040–2069. These were higher relative to those simulated by the statistical model, which were 0.9% (Hailun) – 6.0% (Benxi) during 2010–2039 and then 2.0% (Changling) – 7.3% (Benxi) during 2040–2069.

Keywords: Climate change; Statistical model; APSIM model; Ensemble simulation; Maize; Growth progress; Yield;

作物模型是评价未来气候变化对于作物产量影响的主要工具。其中，机理模型因具有较强的机理性，是气候变化影响研究中最常用的工具，如APSIM[1]、DSSAT[2]、WOFOST[3]、ORYZA[4]等。然而，其复杂的过程需要大量详细的作物生长、管理、土壤等初始数据进行模型校验[5-6]。这些数据的不准确性，增加了模拟结果的不确定性[7-8]。相反，统计模型则无需利用田间生产和管理数据进行模型校验，又可以通过有限的数据，潜在地抓住相对难以理解的某些过程(如病虫害的动态信息)的影响，有效减少了机理模型大量参数带来的不确定性[9-10]。相对于机理模型在气候变化影响中的广泛应用，统计模型的作用逐渐受到关注。例如, Lobell 等[11]建立了国家尺度的历史气象因子和玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)、大豆(*Glycine max*)4 种作物产量的统计模型，量化了 1980—2008 年气候变化对全球粮食作物的影响。Tao 等[12]通过统计模型分析了 1981—2009 年气象条件及栽培管理措施等对我国水稻产量的影响及贡献，有效弥补了机理模型量化历史气象条件下栽培管理措施对产量贡献的不足。

当前气候变化影响研究中，多为单一气候模式驱动单一作物模型得出的结果。而且由于气候模式和作物模型结构的差异得出不同甚至相反的评估结果。如，张建平等[13]应用 WOFOST 模型与不同气候情景数据结合模拟东北玉米产量时得到，基于 RegCM3 输出的多情景加权平均值简称 REA 情景未来 2011—2050 时段玉米产量减产约 8%，而基于 PRECIS 输出的 A2 和 B2 情景产量分别增加 20%和 7%。相反，袁东敏等[14]同样应用 PRECIS 输出的 B2 情景与改进后的东北玉米生长模拟模型[15]结合，模拟得到未来 2011—2050 时段玉米产量以减产为主。同样, Guo 等[16]使用 HadCM3 与 CERES 模型结合在不考虑 CO_2 肥料作用下，研究得到未来华北小麦产量增加。而 Zhang 等[17]应用 PRECIS 输出驱动 APSIM 模型模拟得到，未来华北地区小麦减产。这些问题突出了在气候变化评估中考虑由气候模式和作物模型的结构差异引起研究结果不确定性的重要性[18-20]。为此，本文以东北地区黑龙江省海伦、吉林省长岭、辽宁省本溪地区的春玉米为例(图 1)，借助作物机理模型和统计模型，在 8 个 GCMs 驱动下，基于多模式集合模拟了未来 2010—2039 时段和 2040—2069 时段气候变化对玉米产量的可能影响，旨在减少单一模型对模拟结果不确定性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及数据来源

东北地区主要包括黑龙江、吉林和辽宁三省。属寒温带湿润、半湿润气候带，冬季低温干燥，夏季温

暖湿润。年均气温–3~10 ℃, 年降水量 400~1 000 mm, 其中 80%集中发生在 5—9 月。土地肥沃, 有机质含量达 12.4~34.2 g·kg^{-1}。本区春玉米主要是一年 1 熟制, 播种面积占全国相应作物总播种面积的 30%左右, 是国内重要的商品粮生产基地。

本研究基于能够代表主要玉米产区的生产水平和具有较完善且较长时段的数据资料原则, 选取了黑龙江省海伦(47.4°N, 127.0°E)、吉林省长岭(44.2°N, 124.0°E)、辽宁省本溪(41.3°N, 123.8°E)3 个中国气象局农业气象试验站作为研究点(图 1)。研究站点的作物资料, 来源于国家气象信息中心, 包括 1981—2009 年作物生育期和产量; 同期历史观测气象资料来源于中国气象局科学数据共享服务网, 包括日最高温度、日最低温度、日照时数、降雨量。其中, 日照时数根据 Angström-Prescott 公式转化为总辐射[21]。参照玉米的常年生长发育期, 进一步求取生育期内逐旬的平均最高温度、平均最低温度、累积降雨量和累积辐射量。气候情景数据来源于国家气候中心, 选用 CMIP5 中的 8 个全球模式 BCC-CSM1–1(中国)、CCSM4(美国)、CSIRO-MK3-6-0(澳大利亚)、EC-EARTH(欧洲)、GFDL-ESM2G(美国)、IPSL-CM5A-MR(法国)、MRICGCM3(日本)和 NorESM1-M(挪威), 在 RCP4.5 情景下模拟生成未来气候时段(2010—2039 年和 2040—2069 年)和基准气候时段(1976—2005 年)逐日数据, 包括日最高温度、最低温度、降水。模式分辨率均为 1×1。辐射数据用历史观测数据代替。气候模式数据通过反距离权重插值的方法, 降尺度到研究站点。

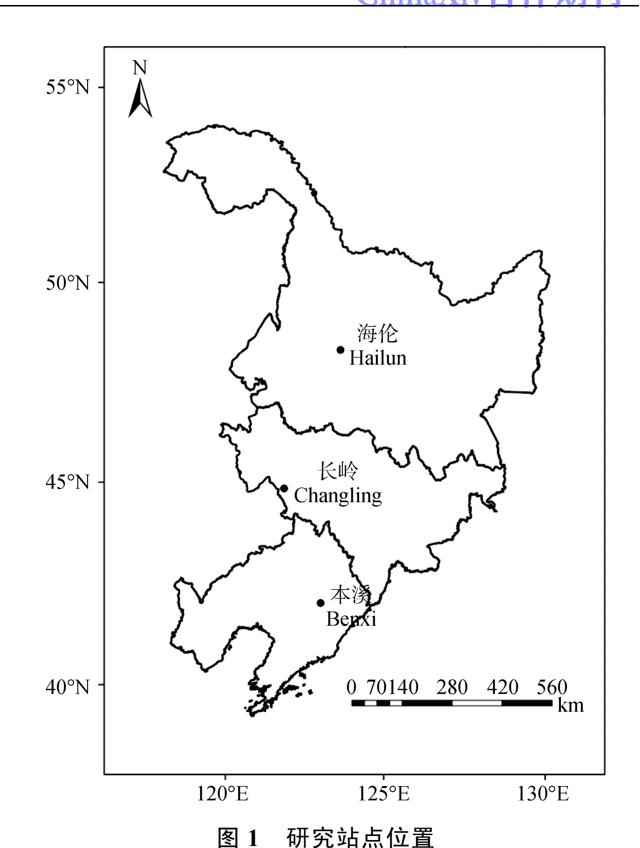


图 1　研究站点位置

Fig. 1　Locations of the selected study stations

1.2　研究方法

本文基于收集的作物、气象等数据, 建立作物统计模型并验证作物机理模型, 通过不同气候模式输出驱动不同作物模型, 采用集合概率方法量化气候变化对玉米产量的可能影响。具体技术流程见图 2。

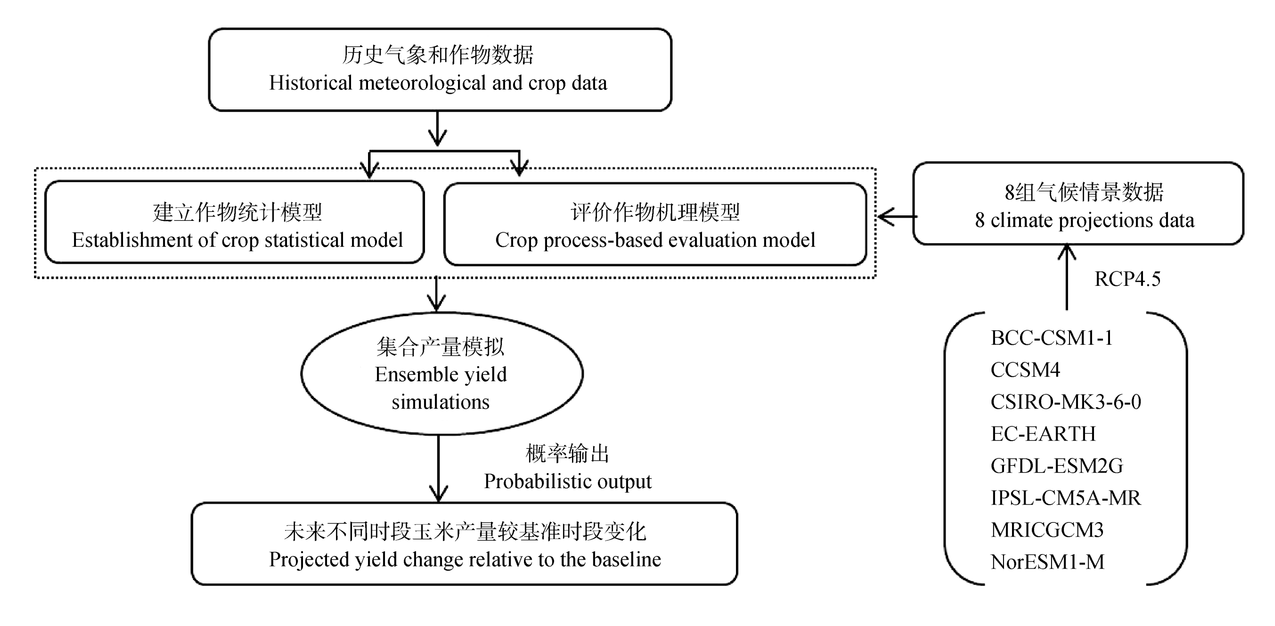


图 2　气候变化对玉米产量影响研究的流程图

Fig. 2　Flowchart for the study of climate change impacts on maize yield

1.2.1 作物机理模型

APSIM 农业生产系统模拟模型自引入我国以来，已经被广泛应用于评价农作物生长受气候波动和环境变化的影响等方面[22-23]。本研究基于站点尺度，以单一气候区的生态型品种作为该区代表性品种，应用 1981—1995 年数据，采用“试错法”，对模型的品种参数进行调试，使模型模拟的开花期、成熟期和产量能够最大程度地接近观测值，应用 1996—2009 年数据对校正后的模型进行验证。选择以下统计指标对模型的模拟能力进行评价，包括模拟值与实测值拟合方程 $y=\alpha x$ 的决定系数 R^2(1∶1)，反映了模型模拟值相对于实测值的真正偏差；斜率 α，反映了模型整体高估或低估实测值的程度；均方根误差 RMSE，反映了模型模拟值相对实测值的绝对误差。

基于 APSIM 模型模拟研究站点代表性品种气候变化下的产量时，播种期采用固定播期，为农业气象试验站 1981—2009 年播种期的平均，收获期为生理成熟日。其他管理措施如灌溉和施肥均设置为最适管理，即不考虑胁迫影响。

1.2.2 作物统计模型

应用 1981—2009 年玉米产量数据建立作物统计模型。模型的建立包括趋势产量(主要受农业技术进步等的影响)和气象产量(主要受气候因子的影响)，以便和机理模型输出的产量同等量级。趋势产量采用多项式拟合方法得到。

海伦：$Y_t = -0.000\,24t^3 + 0.007\,06t^2 + 0.158\,94t + 2.341\,71$
$R^2=0.83$ (1)

长岭：$Y_t = -0.000\,83t^3 + 0.031\,53t^2 - 0.183\,01t + 6.226\,09$
$R^2=0.52$ (2)

本溪：$Y_t = -0.001\,68t^3 + 0.072\,44t^2 - 0.714\,40t + 6.091\,59$
$R^2=0.59$ (3)

式中：Y_t是趋势产量，t是年份序列(取值范围为 1~29，分别代表 1981 年至 2009 年)。由于趋势产量外推的限制，本研究未考虑气候变化下品种、栽培技术等的更新对产量的贡献，等于最近 2005—2009 年趋势产量平均水平。

从作物实际产量中剔除趋势产量，即得到气象产量。气象产量基于玉米生育期内 64 个旬气象因子采用逐步回归方法拟合得到。逐步方法标准使用 F 分布概率，满足 A=0.05 因子引入，A=0.1 因子剔除。

1.2.3 产量分析

本研究使用 8 个气候模式数据驱动 2 个作物模型，在基准气候 1976—2005 年时段、未来 2010—2039 年和 2040—2069 年时段，分别产生 480 组产量模拟数据。考虑到气候变化中应用不同气候模式和不同作物模型对研究结果的可能影响及不确定性，研究通过多模式结合，使用概率密度(PDFs, probability density functions)和累积概率分布函数(CDFs, cumulative distribution functions)量化分析气候变化下玉米产量相对于基准情景变化。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型的站点校验

图 3 显示了模型模拟的玉米开花期、成熟期及产量与观测值的验证结果。α 接近 1.0，表明模型模拟值与观测值接近。生育期和产量的 R^2>0.6，表明模型可以解释 60%以上的观测生育期和产量变化。生育期的 RMSE 为 3~4 d，平均误差不足 3%。产量的 RMSE 为 0.6~0.8 t·hm^{-2}，平均误差小于 11%。整体上，各生育期间的 RMSE 均表现为随着生育进程的增加，误差增大。这主要是由于模型模拟的生育进程取决于之前生育进程的累积。而生育进程的模拟误差，也会影响产量的模拟误差。此外，考虑到观测过程中的可能误差，如取样的不均匀等，认为 APSIM 模型对站点的玉米生长具有较好的模拟能力。

2.2 作物统计模型建立

产量统计模型中的各参数及其系数如表 1 所示。从回归模型可以看出，玉米开花灌浆阶段(7 月中旬到 9 月上旬)的温度和产量具有负相关关系。该阶段温度的增长加速了生育进程，减少了生物量积累，从而影响了产量形成。相反，玉米出苗阶段(5 月中旬)的温度和气象产量具有正相关关系。该阶段温度的适度增长利于作物出苗及壮苗形成。玉米开花灌浆过程中大量降雨或光照不足的天气，容易影响散粉和授粉，诱发籽粒败育，最终导致产量减少。

2.3 不同作物模型模拟的玉米产量变化

表 2 显示，基于不同作物模型模拟的玉米产量在未来气候变化下均降低。2040—2069 年时段的减产率高于 2010—2039 年时段。也就是说，随着气候变化的加剧，减产率增大。基于机理模型模拟的未来两个时段减产率均高于统计模型的模拟结果。2010—2039 年时段，最突出的为长岭地区，基于 APSIM 机理模型的产量降低约 8.4%，而统计模型的模拟结果仅 1.4%。2040—2069 年时段，同样以长岭地区最为明显，基于 APSIM 机理模型的产量降低约 12.6%，而统计模型的产量降低仅为 2.0%。从研究点的整体平均变化看，未来 2010—2039 年气候变化下基于机理模型模拟的产量降低约 6.6%(海伦)~8.9%(本溪)，2040—2069 年时段产量降低为 9.7%(海伦)~13.7%(本溪)；

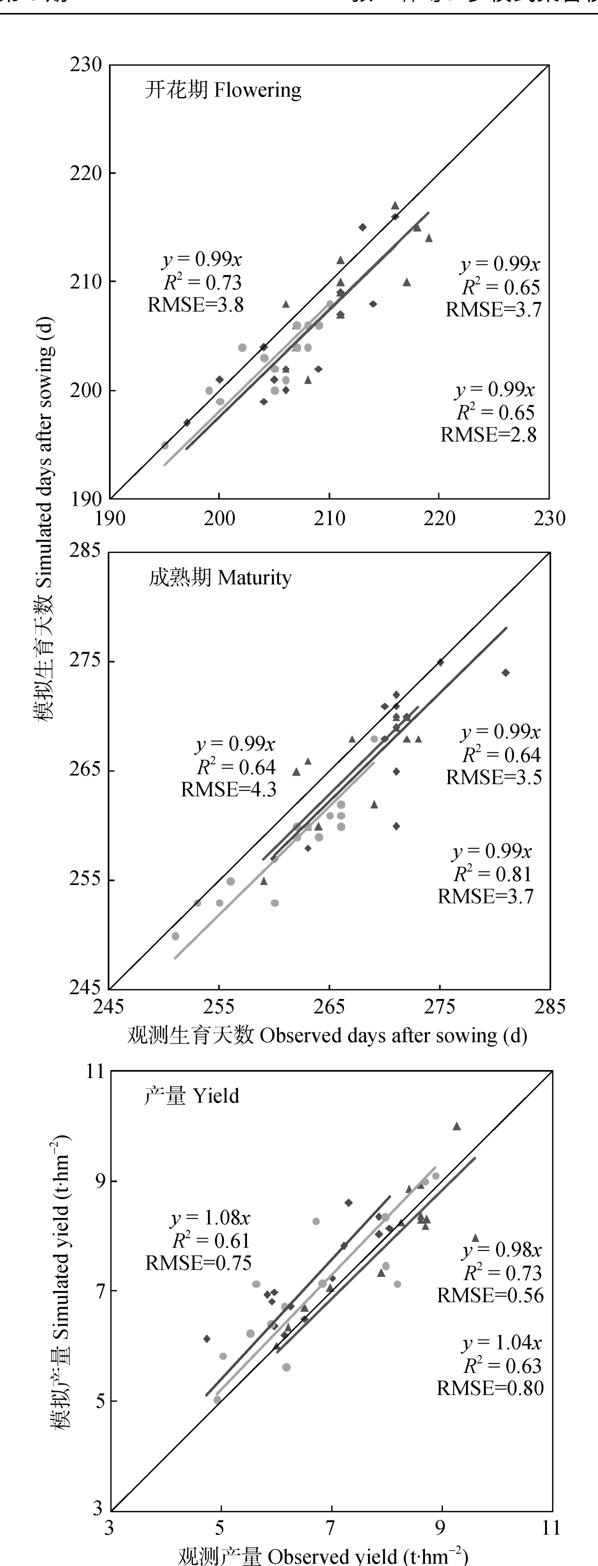


图 3　海伦(◆)、长岭(▲)和本溪(●)玉米开花期、成熟期天数和产量的观测值和模拟值验证结果

Fig. 3　Validation results between the observed and simulated days of flowering and maturity stages, and yield of maize at Hailun(◆), Changling(▲), Benxi(●)

相反，统计模型的模拟产量降低程度较小，相应时段分别为 0.9%(海伦)~6.0%(本溪)和 2.0%(长岭)~7.3%(本溪)。基于不同模型模拟产量变化的标准偏差及离散程度没有明显差异。

2.4　气候变化对玉米产量影响的概率分析

基于多模式集合，气候变化下 2010—2039 年时段和 2040—2069 年时段玉米产量相对基准时段变化的概率密度和累积概率结果(图 4)可看出，产量变化概率密度符合一般正态分布，但是峰值位置随着气候变化的加剧向左偏移增大，负面积增加，表明产量降低的可能性增大。气候变化下 2010—2039 年时段玉米产量降低的概率约为 64%(长岭)~73%(本溪)，2040—2069 年时段概率增加到 74%(海伦)~83%(本溪)。与基准时段玉米产量相比，2010—2039 年时段玉米产量平均降低 3.8%(海伦)~7.4%(本溪)，2040—2069 年时段产量继续降低，达 6.4%(海伦)~10.5%(本溪)。整体上，气候变化下玉米产量变化数据离散程度较高，平均约 11%。

3　讨论与结论

不同结构作物模型模拟结果表明，基于机理模型模拟的玉米产量变化大于统计模型模拟结果。这与当前的相关研究结论一致。大量基于机理模型评估的产量变化以–11%~20%为主[23-26]，而统计模型的研究结果变化不足 10%。如马玉平等[27]利用积分回归法建立的我国不同省区玉米产量与气象因子的相关模型，预测未来全国玉米产量降低在 7%以内。而 Zhang 等[28]和 Zhou 等[29]应用 CIMP5 的多个 GCMs 数据与不同参数的作物统计模型结合，评估得到未来东北地区玉米产量变化不足 5%。此外, Roudier 等[30]通过综合分析西非地区 16 篇气候变化对作物产量影响的文献，也得到了相似的研究结果。这可能是由于作物机理模型相对于统计模型而言更能捕获气候因子之间的相互关系(如极端气温、降水、平均气温)导致的复杂的非线性产量响应。

本研究对未来玉米产量的评估，仅考虑了单一的气候因素的影响，并没有考虑随着气候变化作物栽培措施的调整以及 CO_2 浓度增加等的影响。已有研究表明，随着气候变化，采取一定的适应性措施，如，品种的更替[31]，播种期的调整[32]，均有利于作物产量的提高。此外, CO_2 浓度升高利于缓解或抵消温度升高造成的负面影响，提高作物产量。

多模式集合是降低气候变化影响评估结果不确定性的有效方法。本研究从气候模式结构和作物模型结构差异对研究结果影响不确定性角度出发，通过多模式集合评估，在一定程度上反映了未来东北

表 1 海伦、长岭和本溪 3 地玉米产量统计模型参数系数

Table 1 Coefficients of parameters of maize yield statistical models at Hailun, Changling and Benxi

地点 Site	趋势产量 Trend yield ($t\cdot hm^{-2}$)	气象产量 Meteorological yield				常数项 Constant
		正相关 Positive correlation		负相关 Negative correlation		
		参数 Parameter	系数 coefficient	参数 Parameter	系数 coefficient	
海伦 Hailun	7.13	5 月中旬最低温度 Average minimum temperature in middle May	0.009	9 月上旬最低温度 Average minimum temperature in early September	−0.209	2.370
				8 月中旬累积降水 Accumulated precipitation in middle August	−0.008	
长岭 Changling	7.86			8 月下旬最低温度 Average minimum temperature in late August	−0.344	5.378
本溪 Benxi	6.34	5 月中旬最高温度 Average maximum temperature in middle May	0.238	7 月中旬最高温度 Average maximum temperature in middle July	−0.290	0.801
		8 中旬总辐射 Accumulated solar radiation in middle August	0.014			

表 2 基于作物统计和机理模型的 2010—2039 年和 2040—2069 年时段海伦、长岭、本溪 3 地相对于基准时段(1976—2005 年)的 5%、95%和平均气候变化的玉米产量变化(Mean)及标准偏差(S.D.)

Table 2 Maize yield changes (Mean) and standard deviation (S.D.) under 5%, 95%, mean climate changes during the periods of 2010–2039 and 2040–2069, relative to 1976–2005 based on statistical and process-based crop model at Hailun, Changling, Benxi

地点 Site	时段 Period	APSIM 机理模型 Process-based APSIM model				统计模型 Statistical model			
		Mean (%)	S.D.(%)	P5 (%)	P95 (%)	Mean (%)	S.D. (%)	P5 (%)	P95 (%)
海伦 Hailun	2010—2039	−6.6	8.2	−24.9	3.0	−0.9	8.1	−13.1	8.9
	2040—2069	−9.7	10.6	−29.7	6.3	−3.1	7.6	−17.9	6.7
长岭 Changling	2010—2039	−8.4	10.2	−27.0	3.6	−1.4	15.2	−28.3	21.2
	2040—2069	−12.6	10.0	−30.8	3.6	−2.0	7.2	−13.9	7.4
本溪 Benxi	2010—2039	−8.9	12.1	−30.9	4.1	−6.0	11.9	−29.7	13.4
	2040—2069	−13.7	10.5	−32.0	3.8	−7.3	11.1	−27.6	8.2

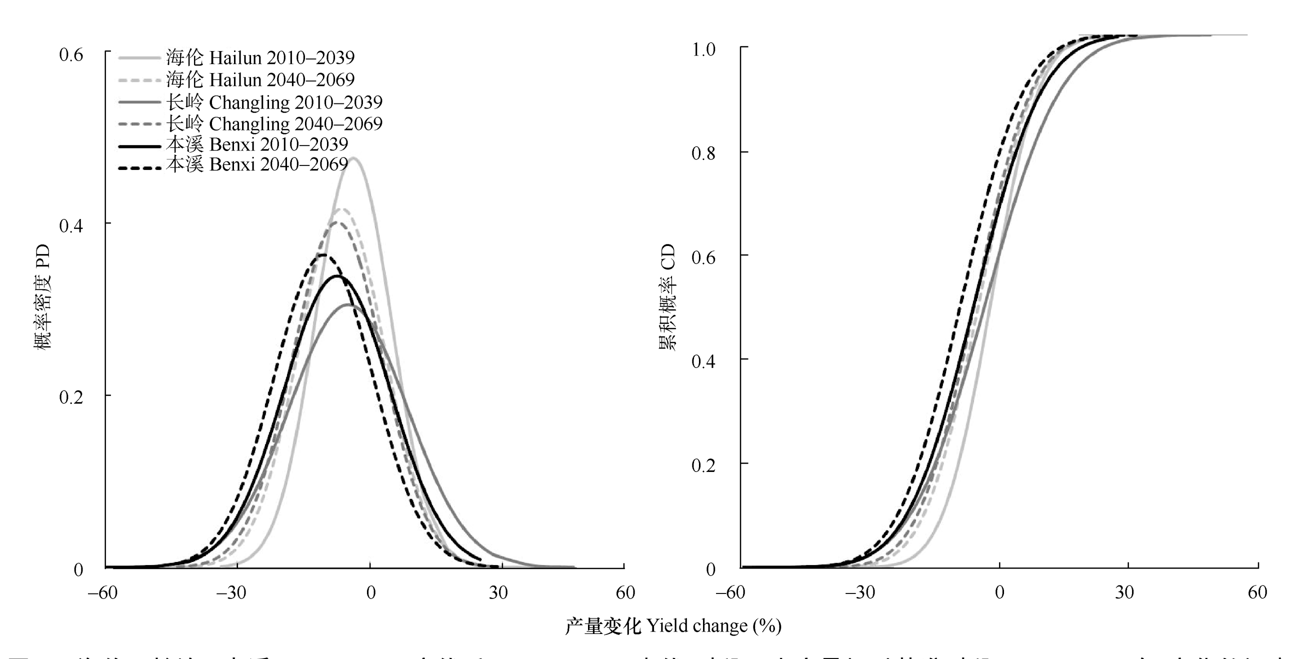


图 4 海伦、长岭、本溪 2010—2039(实线)和 2040—2069(虚线)时段玉米产量相对基准时段(1976—2005 年)变化的概率密度及累积概率分布

Fig. 4 Probability density (PD) and cumulative density (CD) for simulated maize yield changes during 2010–2039 (solid line) and 2040–2069 (dash line), relative to baseline (1976—2005) at Hailun, Changling, Benxi

地区玉米产量变化的可能范围，得到未来 2010—2039 年时段和 2040—2069 年时段玉米产量分别降低 3.8%~7.4%和 6.4%~10.5%。这与 Tao 等[26]基于多套气候情景数据与作物机理模型结合的研究结果相似。值得注意的是，Zhou 等[29]通过综合考虑气候模式和作物统计模型内部参数引起的不确定性，评估得到未来东北地区玉米产量有增加趋势。这些研究差异体现了作物模型选择的敏感性，另一方面也突出了考虑模型内部参数的重要性。因此，结合前人研究成果，综合考虑气候模式结构、作物模型结构及模型内部参数不确定性对研究结果的影响，是下一步研究的重点。

致谢　衷心感谢国家气候中心徐颖研究员为本研究提供的气候情景数据支持。

参考文献 References

[1] Hammer G L, van Oosterom E, McLean G, et al. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(8): 2185–2202

[2] 周丽丽, 梁效贵, 高震, 等. 基于 CERES-Wheat 模型的沧州地区冬小麦需水量分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1320–1328
Zhou L L, Liang X G, Gao Z, et al. Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou Area using CERES-Wheat model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1320–1328

[3] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1158–1165
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, et al. Impact simulation of drought disaster at different developmental stages on winter wheat grain-filling and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1158–1165

[4] Bouman B A M, van Laar H H. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions[J]. Agricultural Systems, 2006, 87(3): 249–273

[5] 杨靖民, 窦森, 杨靖一, 等. 基于 DSSAT 模型的吉林省黑土作物-土壤氮循环和土壤有机碳平衡[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2075–2083
Yang J M, Dou S, Yang J Y, et al. Crop-soil nitrogen cycling and soil organic carbon balance in black soil zone of Jilin Province based on DSSAT model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2075–2083

[6] Liu Z J, Yang X G, Hubbard K G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China[J]. Global Change Biology, 2012, 18(11): 3441–3454

[7] Bassu S, Brisson N, Durand J L, et al. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors[J]. Global Change Biology, 2014, 20(7): 2301–2320

[8] Li T, Hasegawa T, Yin X Y, et al. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1328–1341

[9] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1443–1452

[10] 史文娇, 陶福禄, 张朝. 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1213–1222
Shi W J, Tao F L, Zhang Z. Identifying contributions of climate change to crop yields based on statistical models: A review[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1213–1222

[11] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616–620

[12] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981–2009 in China, and late rice was just opposite[J]. Global Change Biology, 2013, 19(10): 3200–3209

[13] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同气候情景下中国东北与华北作物产量变化趋势模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 262–266
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, et al. Simulation of change trend of crop yields under different climate change scenarios in Northeast and North China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 262–266

[14] 袁东敏, 尹志聪, 郭建平. SRES B2 气候情景下东北玉米产量变化数值模拟[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 284–292
Yuan D M, Yin Z C, Guo J P. Numerical simulation of maize yield variation in northeast China under B2 climate change scenario[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(3): 284–292

[15] 袁东敏, 郭建平. CO_2 浓度增加对东北玉米生长影响的数值模拟[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 822–829
Yuan D M, Guo J P. Numerical simulation of impact of CO_2 enrichment on maize growth in northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 822–829

[16] Guo R P, Lin Z H, Mo X G, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1185–1194

[17] Zhang Y, Feng L P, Wang J, et al. Using APSIM to explore wheat yield response to climate change in the North China Plain: The predicted adaptation of wheat cultivar types to vernalization[J]. The Journal of Agricultural Science, 2013, 151(6): 836–848

[18] Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 827–832

[19] Challinor A J, Wheeler T R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: Processes and uncertainties[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(3): 343–356

[20] 葛全胜, 王绍武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 191–203

Ge Q S, Wang S W, Fang X Q. An uncertainty analysis of understanding on climate change[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 191–203
[21] Prescott J A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64(1): 114–118
[22] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 1961—2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 293–305
Dai T, Wang J, He D, et al. Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 293–305
[23] Zhang Y, Zhao Y X, Chen S N, et al. Prediction of maize yield response to climate change with climate and crop model uncertainties[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(4): 785–794
[24] Xiong W, Matthews R, Holman I, et al. Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change[J]. Climate Change, 2007, 85(3/4): 433–451
[25] 米娜, 张玉书, 蔡福, 等. 未来气候变化对东北地区玉米单产影响的模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(8): 117–123
Mi N, Zhang Y S, Cai F, et al. Modelling the impacts of future climate change on maize productivity in Northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(8): 117–123
[26] Tao F, Zhang Z. Impacts of climate change as a function of global mean temperature: Maize productivity and water use in China[J]. Climate Change, 2011, 105(3/4): 409–432
[27] 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩, 等. 预测未来 40 年气候变化对我国玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 224–232
Ma Y P, Sun L L, E Y H, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 224–232
[28] Zhang Y, Zhao Y X, Wang C Y, et al. Using statistical model to simulate the impact of climate change on maize yield with climate and crop uncertainties[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, doi: 10.1007/s00704-016-1935-2
[29] Zhou M Z, Wang H J. Potential impact of future climate change on crop yield in northeastern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(7): 889–897
[30] Roudier P, Sultan B, Quirion P, et al. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say[J]. Global Environmental Change, 2011, 21(3): 1073–1083
[31] Liu Z J, Hubbard K G, Lin X M, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J]. Global Change Biology, 2013, 19(11): 3481–3492
[32] Meng Q F, Hou P, Lobell D B, et al. The benefits of recent warming for maize production in high latitude China[J]. Climatic Change, 2014, 122(1/2): 341–349